Vol.2013-CG-153 No.26
Vol.2013-CVIM-189 No.26
2013/11/29

非等方最小全域木による樹状線画

李 少龍[1]　　原 健二[1,a)]　　浦浜 喜一[1,b)]

概要：モノクロ画像から地形図を生成するノンフォトリアリスティックレンダリング手法を提案する．まず，画素値順ポアソンディスクサンプリングで入力画像から点描画を生成する．次に，それらの点を Prim 法で繋いで最小全域木を生成する．点間の距離として，ユークリッド距離，バイラテラル距離，符号反転バイラテラル距離を用いた場合を比較検証する．最後に，最小全域木からの距離変換を入力画像に加えて高さ画像としたバンプマッピングで地形図を求める．入力画像のエッジからの距離変換を高さ画像とする場合も実験し，符号反転バイラテラル距離が自然な谷の流れの地形図の生成に適すことを示す．

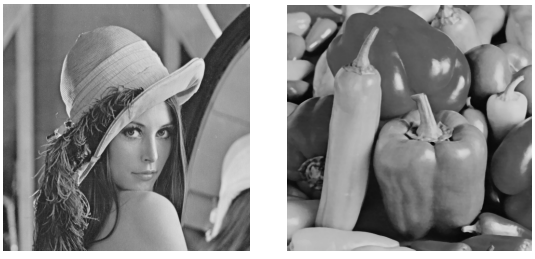
1. はじめに

線画によるハーフトーニングの一手法として，樹状線画を生成するノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR) 法が提案されている [1], [2], [3]．また樹状線画を高さ画像として地形図を生成する NPR 法も提案されている [4]．本稿では, 点描画から最小全域木 (minimu spanning tree: MST) を生成する同様な NPR 法を示す．エッジを強調する点描画として構造反映誤差拡散法 [5] などが提案されているが，本稿では画素値順ポアソンディスクサンプリング (PDS)[6] で点描画を生成し，バイラテラル距離に基づく MST で樹状線画を生成する．

2. 点描画

まず最初に，モノクロ入力画像から点描画を生成する．ここでは，エッジの保存性が高い点描画の生成法である画素値順スキャン PDS[6] を用いる．画素値順 PDS の手順は以下である．

1. 各画素 (i, j) での半径 r_{ij} を設定する．
2. 各画素の値 d_{ij} に値が 0 以上 1 以下の一様乱数 n_{ij} を加えて $f_{ij} = d_{ij} + n_{ij}$ とする．
2. f_{ij} が小さい順番に，全ての画素に番号 $k(= 1, ..., n)$ を付ける．
3. $k = 1$ の画素に点を打つ．
4. k を 1 増やす．$k = n$ なら終了．$k < n$ ならステップ 5



(a) lena　　(b) peppers

図 1　入力画像
Fig. 1　Input images.



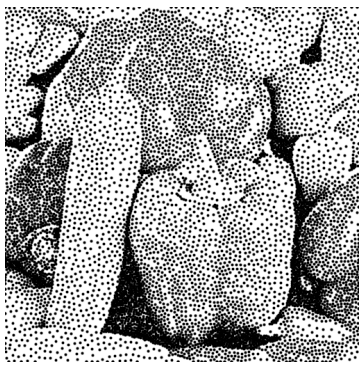


図 2　点描画
Fig. 2　Stippling images.

[1] 九州大学　芸術工学研究院，福岡市
Kyushu University, Fukuoka 815–8540, Japan
[a)] hara@design.kyushu-u.ac.jp
[b)] urahama@design.kyushu-u.ac.jp

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

へ.

5. 番号が k の画素 (i,j) を中心として半径 r_{ij} の円内に，まだ点が打たれてなければ，その画素に点を打ってステップ 4 へ．既に点が打たれていれば点を打たずにステップ 4 へ.

このステップ 1 での半径は，画素値に比例させて $r_{ij} = a + bd_{ij}/255$ とする．図 1(a),(b) の入力画像から生成された点描画を図 2 に示す．$a = 2, b = 8$ とした.

3. 最小全域木 (MST)

次に，これらの点を線で接続して MST を生成する．Prim のアルゴリズムは以下の手順である.

1. 処理済みの点の集合 S を空集合とする.
2. 任意の点を 1 つ選んで集合 S へ入れてステップ 3 へ..
3. 全部の点が集合 S に入れられたら終了．そうでなければ，未処理の各点から，集合 S に含まれる各点までの距離を求め，距離が最小の点どうしを線で繋ぐ.
4. 繋がれた点を集合 S に移してステップ 3 へ.

4. バイラテラル距離

この MST を生成するには，点どうしの距離を定義する必要がある．本稿では以下の 3 つの距離で実験した.

4.1 ユークリッド距離

点 i の (x,y) 座標を (x_i, y_i) とすると，点 i と j のユークリッド距離 ED は

$$E_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \qquad (1)$$

である．これは空間的に等方 (回転対称) である．この ED による MST を図 3 に示す．これも図 2 同様ハーフトーニングになっているが，線の向きはランダムである.

4.2 バイラテラル距離

図 1 の画素値を d_i とすると

$$B_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \alpha(d_i - d_j)^2} \qquad (2)$$

はバイラテラル距離 (BD) と呼ばれ [7]，空間的に非等方である．$e^{-\beta B_{ij}^2}$ を係数とするフィルタはバイラテラルフィルタ (BF) と呼ばれる [8]．$\alpha = 0$ のとき式 (2) は式 (1) になり，BF はガウスフィルタ (GF) になる．この BD による MST を図 4 に示す．$\alpha = 1$ とし，図 1 を GF で少しぼかした画像を d_i とした．線が図 1 の濃淡の等高線に沿っており，物体の輪郭が分かりやすくなっている.

4.3 符号反転バイラテラル距離

MST の線を谷とする地形図を生成するのを考える．図 1 の視知覚では，白い所は手前に，暗い領域は奥まって感じられる傾向がある [9]．これは実際の 3D 形状とは一致しないが，ここでは単純に図 1 を高さ画像とし，その地表に MST の谷が走っているとする．谷を刻む水は地面の勾配に従って流れる．従って，図 3 のランダムな向きや，図 4 の等高線に沿った向きは谷線にはそぐわない．そこで，式

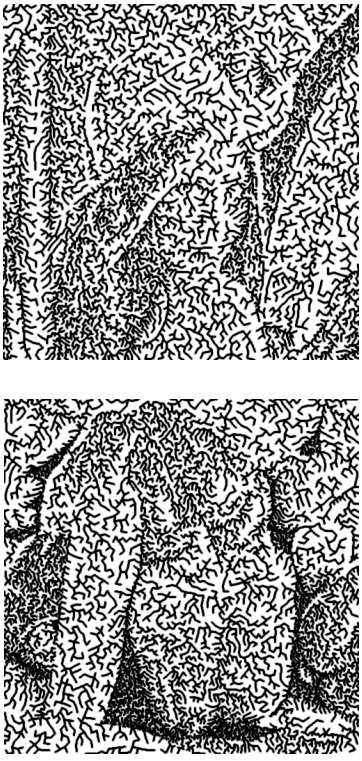


図 3 ED による MST
Fig. 3 MST with ED.



図 4 BD による MST
Fig. 4 MST with BD.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

(2) の第 3 項の符号を反転させて

$$SIB_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+\alpha s[h-(d_i-d_j)^2]} \quad (3)$$

とする．ここで $s(x)$ は，$x>0$ なら $s(x)=x$，$x\leq 0$ なら $s(x)=0$，すなわち $s(x)=\max\{x,0\}$ である．式 (3) を符号反転 (sign inverted)BD(SIBD) と呼ぶことにする．$e^{-\beta SIB_{ij}^2}$ を係数とするフィルタは係数反転 BF と呼ばれ [10]，誤差拡散ハーフトーニングに用いられた．この SIBD による MST を図 5 に示す．$\alpha=0.5, h=300$ とした．この SIBD による線の向きは BD による線と直交し，濃淡勾配に沿っており，図 1 のエッジが強調されている．

ちなみに，図 4 と図 5 の MST を重ね描きした図を付録に示す．不規則な形状のタイル風ハーフトーニング線画になっている．

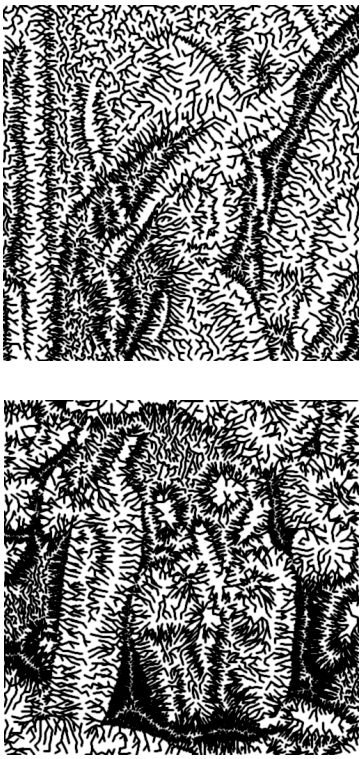


図 5 SIBD による MST
Fig. 5 MST with SIBD.

5. 地形図

図 1 を高さとし，MST の谷を付け加えるために，MST からの距離変換を求め，図 1 に加えて高さ画像 (height field) としてバンプマッピングした．カラー画像は，図 1 の白い所 (高地) を赤とし，暗い所 (低地) を緑とした．図 3，図 4，図 5 からの地形図を図 6，図 7，図 8 に示す．SIBD による図 8 では，尾根が明瞭で地形図として自然である．

6. エッジからの距離を高さとする地形図

図 1 から生成する別の地形図として，図 1 から主要エッジを抽出し，その主要エッジを谷底 (川) とし，エッジからの距離を高さとするのを考える．EDISON(http://coewww.rutgers.edu/riul/research/code/EDISON/) を使って図 1 から抽出した主要エッジを図 9(a),(b) に，それからの距離変換を (c),(d) に示す．

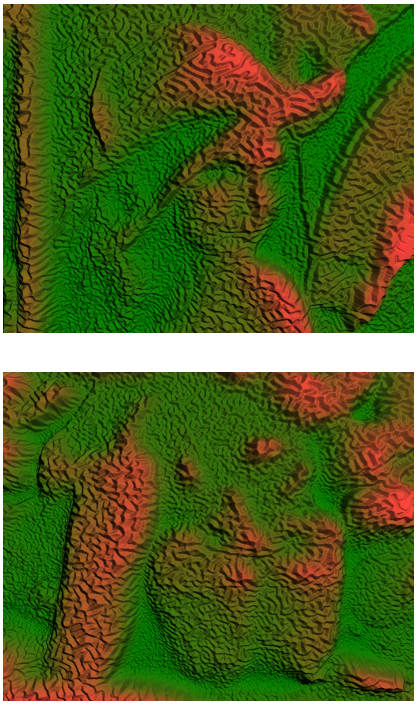


図 6 図 3 からの地形図
Fig. 6 Terrain image from Fig.3.

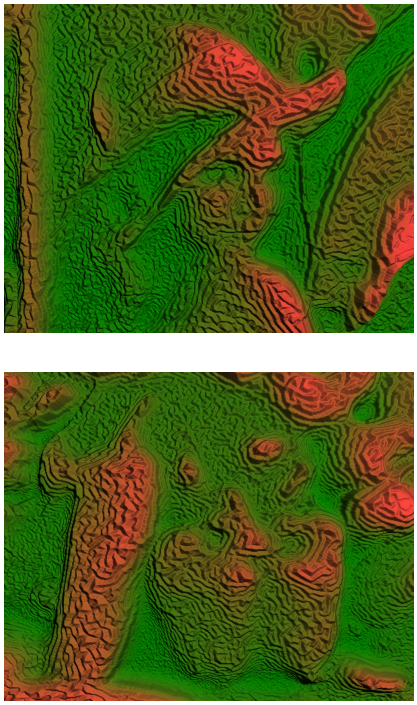


図 7 図 4 からの地形図
Fig. 7 Terrain image from Fig.4.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

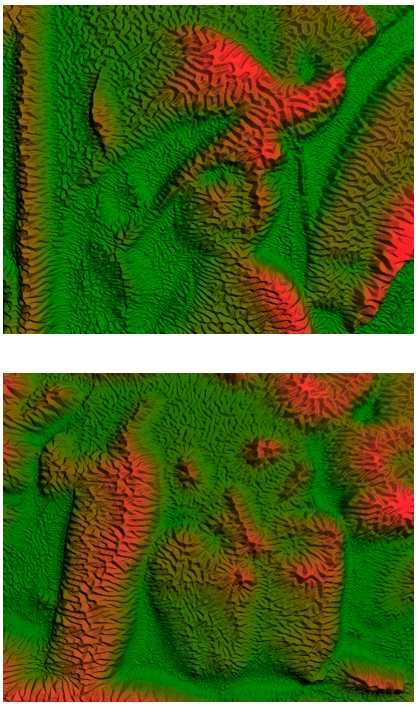
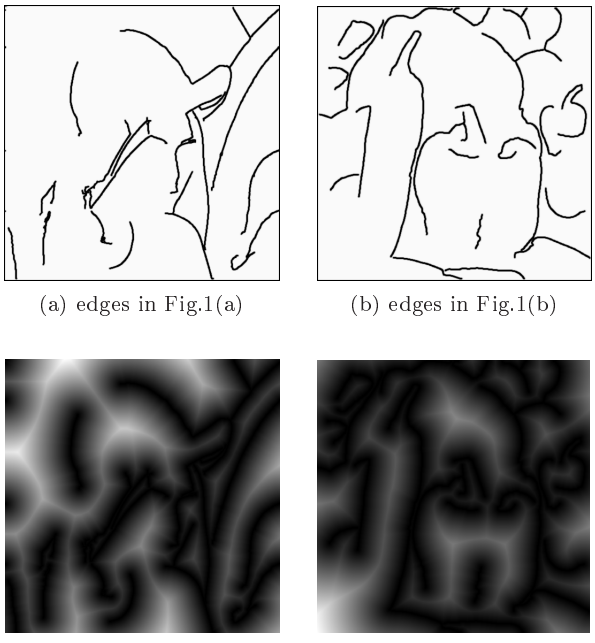


図 8 図 5 からの地形図
Fig. 8 Terrain image from Fig.5.

6.1 クロスバイラテラル距離

4.2 節の式 (2) や 4.3 節の式 (3) では，図 1 の入力画像の画素値を d_i としたが，本節では図 9(c),(d) を d_i とする．このように，入力画像以外の補助画像からフィルタ係数を求める BF はクロス BF[11] と呼ばれる．ED は d_i にはよらないので，4.1 節のままであるが，4.2 節の式 (2) を本節ではクロス BD(CBD)，4.3 節の式 (3) をクロス SIBD(CSIBD) と呼ぶことにする．



(a) edges in Fig.1(a) (b) edges in Fig.1(b)
(c) DT of Fig.9(a) (d) DT of Fig.9(b)

図 9 図 1 の主要エッジと距離変換
Fig. 9 Major edges in Fig.1 and their distance tranforms.

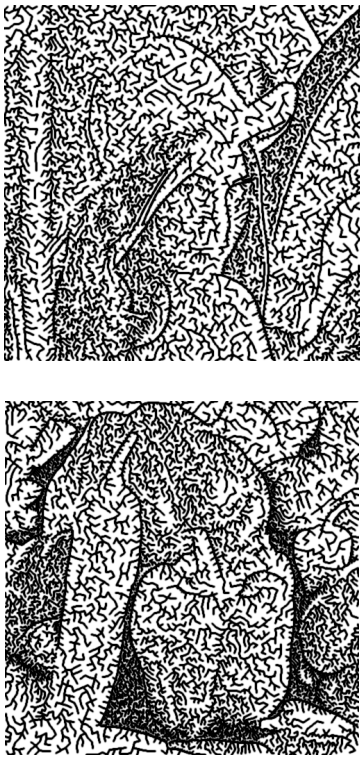


図 10 ED による MST
Fig. 10 MST with ED.

6.2 MST

エッジも含めた MST を求めるために，図 9(a),(b) のエッ

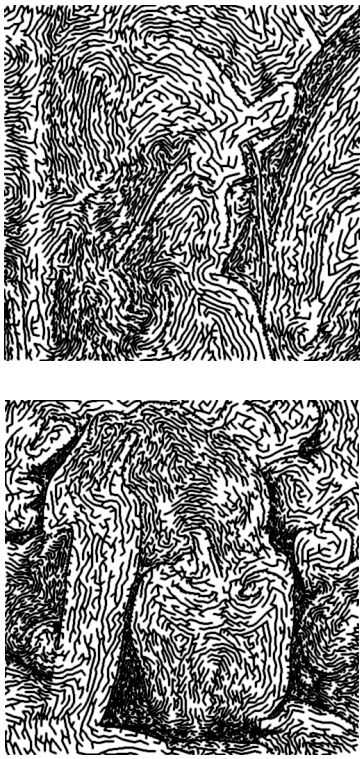


図 11 CBD による MST
Fig. 11 MST with CBD.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

ジ上の画素も個々の点として図 2 の点に加えて，Prim 法で MST を求める．得られた MST を図 10〜12 に示す．線の向きは，ED による図 10 では図 3 と同じくランダムであるが，CBD による図 11 ではほぼエッジに沿っており，CSIBD による図 12 ではエッジにほぼ直交している．



図 12 CSIBD による MST
Fig. 12 MST with CSIBD.

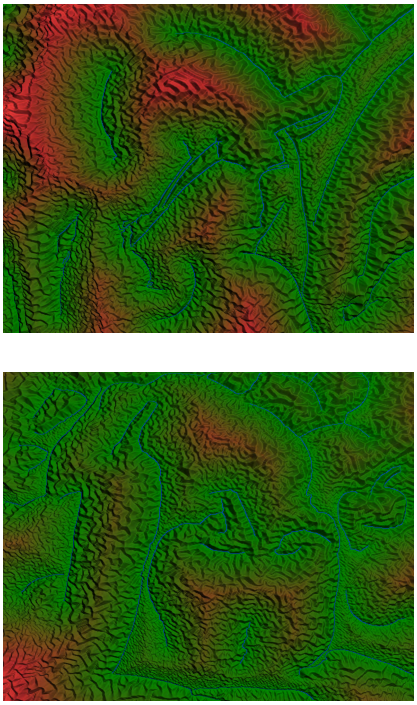


図 13 図 10 からの地形図
Fig. 13 Terrain image from Fig.10.

6.3 地形図

図 10〜12 の MST からの距離変換を図 9(c),(d) に加えて高さ画像とし，図 9(c),(d) の白い所を赤，暗い所を緑とし，図 9(a),(b) のエッジを青にしたカラー画像をバンプマッピングした結果を図 13〜15 に示す．CSIBD による図 15 は尾根もはっきりしており，谷の流れも自然である．

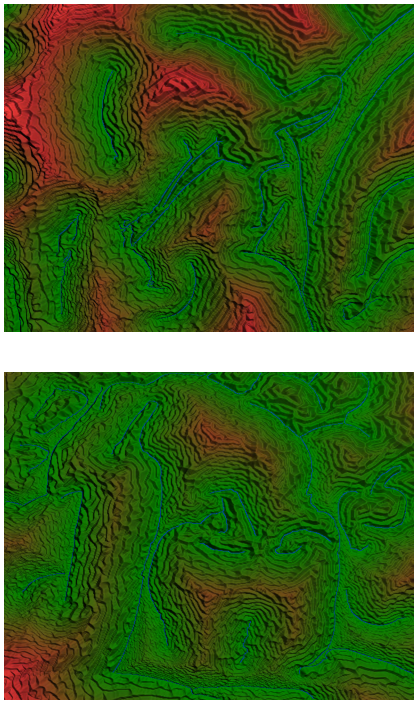


図 14 図 11 からの地形図
Fig. 14 Terrain image from Fig.11.

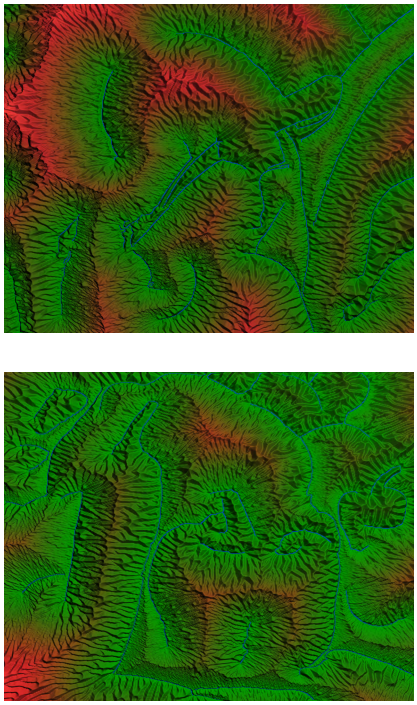


図 15 図 12 からの地形図
Fig. 15 Terrain image from Fig.12.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

7. あとがき

非等方最小全域木による樹状線画に基づいて地形図を生成する NPR 法を提案し，符号反転バイラテラル距離が自然な地形図の生成に有用であることを示した．本稿ではハーフトーニング点描画から地形図を生成したが，地形図に適した点配置の点描画を求めるのが今後の課題である．

参考文献

[1] A. Corbo and L. Figueiredo: *Fracture patterns for non-photorealistic rendering*, poster in SIBGRAPI (2008).
[2] K. Inoue and K. Urahama: *Halftoning with minimum spanning trees*, poster in Pac. Graph. (2008).
[3] J. Long and D. Mould: *Dendritic stylization*, Visual Computer, 25, 3, pp.241-253 (2009).
[4] 高田 洋佑，浦浜喜一: **距離変換からの樹状線画の生成と *NPR* への応用**, 画電学誌, 38, 5, pp.791-794 (2009).
[5] H. Li and D. Mould: '*Structure-preserving stippling by priority-based error diffusion*, Proc. GI, pp.127-134 (2011).
[6] 王濤，胡忠英，井上光平，原健二，浦浜喜一: **画素値順 *PDS* による点描画と重み付きボロノイ分割による逆点描画**, 画像の理解認識シンポジウム (MIRU), IS3-42 (2012).
[7] 胡忠英，浦浜喜一: **バイラテラル *Lp* 距離に基づく非等方ストローク生成の簡便法**, 信学論, J94-A, 3, pp.226-229 (2011).
[8] C. Tomasi and R. Manduchi: *Bilateral filtering for gray and color images*, Proc.ICCV, pp.839-846 (1998).
[9] J. Lopez-Moreno, J. Jimenez, S. Hadap, E. Reinhard, K. Anjyo and D. Gutierrez, "Stylized depiction of images based on depth perception", Proc. NPAR, pp.109-118, 2010.
[10] 傅暁宇，王濤，浦浜喜一: **係数反転バイラテラルフィルタによる誤差拡散ハーフトーニング**, 映情学誌, 65, 12, pp.1817-1820 (2011).
[11] E. Eisemann and D. Durand: *Flash photography enhancement via intrinsic relighting*, ACM Trans. Graph., 23, 3, pp.673-678 (2004).

付　　録

図 4 と図 5 の MST を重ね描きしたのを図 16 に，図 11 と図 12 の重ね描きを図 17 に示す．また，図 16 と図 17 を地形図風にしたのを図 18 と図 19 に示す．これらは自然な谷の流れではないが，凹凸の多い地形図になっている．

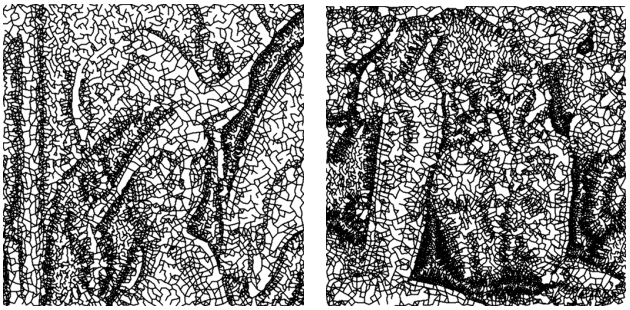


図 16　図 4 と図 5 の重ね描き
Fig. 16　Superposition of MSTs in Fig.4 and Fig.5.

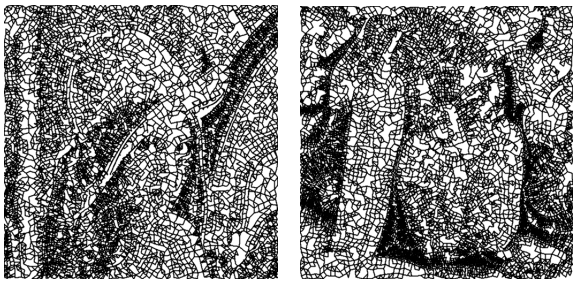


図 17　図 11 と図 12 の重ね描き
Fig. 17　Superposition of MSTs in Fig.11 and Fig.12.

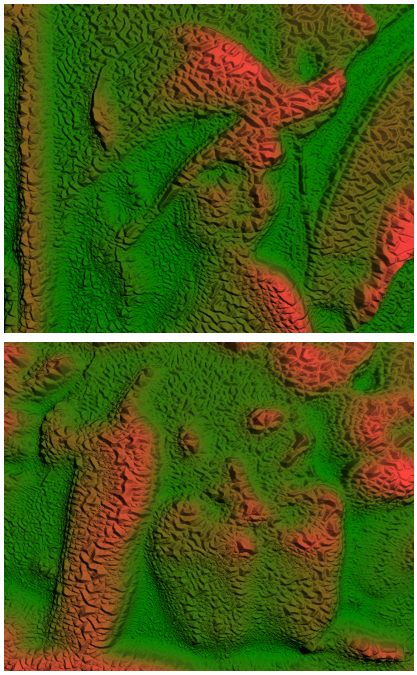


図 18　図 16 からの地形図
Fig. 18　Terrain images from Fig.16.

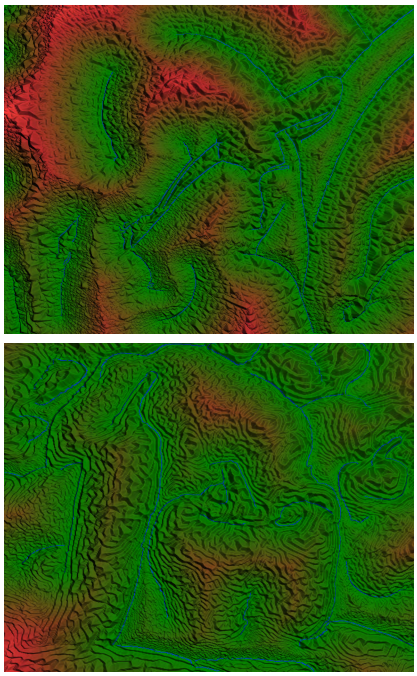


図 19　図 17 からの地形図
Fig. 19　Terrain images from Fig.17.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan